

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-154047

(43)Date of publication of application : 08.06.2001

(51)Int.Cl. G02B 6/122  
G02B 6/12  
G02F 1/025  
H01S 5/22

(21)Application number : 11-334373

(71)Applicant : HAMAMATSU PHOTONICS KK

(22)Date of filing : 25.11.1999

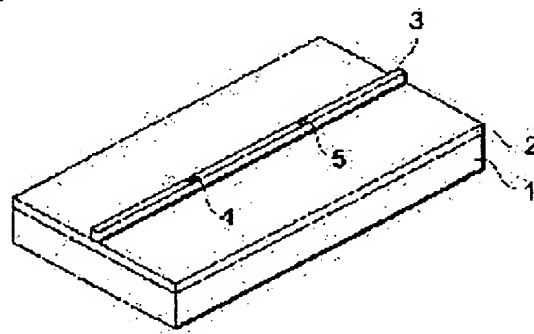
(72)Inventor : MIZUSHIMA YOSHIHIKO

(54) STRUCTURE OF SEMICONDUCTOR OPTICAL WAVEGUIDE, AND OPTICAL AMPLIFIER, OPTICAL MODULATOR, OPTICAL OSCILLATOR AND OPTICAL INTEGRATED CIRCUIT USING THE SAME

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a semiconductor optical waveguide, capable of being used in view of the performance of an integrated circuit, an optical amplifier, an optical modulator and an optical oscillator using it and an optical integrated circuit using these devices.

SOLUTION: This integrated circuit is provided with a semiconductor substrate, an insulating film formed on the semiconductor substrate, a semiconductor thin wire formed on the insulating film, a pair of electrodes formed in the semiconductor thin wire, and light is propagated passing through the semiconductor thin wire. When the integrated circuit is applied to signal transmission between elements in an LSI, a space occupied by wiring is reduced, consideration for a CR time constant of wiring is not required, the number of parts is reduced, owing to amplifiability and directivity and ultra-high frequency signals are transmitted. Thus, the LSI is easily designed and manufactured, and a very large scale integrating technology is utilized.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision]

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2001-154047

(P2001-154047A)

(43) 公開日 平成13年6月8日(2001.6.8)

(51)Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テームト*(参考)	
G 0 2 B	6/122	G 0 2 F	1/025	2 H 0 4 7
	6/12	H 0 1 S	5/22	2 H 0 7 9
G 0 2 F	1/025	G 0 2 B	6/12	A 5 F 0 7 3
H 0 1 S	5/22			N
				Z
審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 5 頁)				

(21) 出願番号 特願平11-334373

(22) 出願日 平成11年11月25日(1999.11.25)

(71) 出願人 000236436

浜松ホトニクス株式会社

静岡県浜松市市野町1126番地の1

(72) 発明者 水島 宜彦

静岡県浜松市市野町1126番地の1 浜松ホ  
トニクス株式会社内

(74) 代理人 100088155

弁理士 長谷川 芳樹 (外2名)

Fターム(参考) 2H047 KA05 KA12 PA01 QA02 RA00  
TA00

2H079 AA02 BA01 DA16 EA03 EB04

HA11 JA00

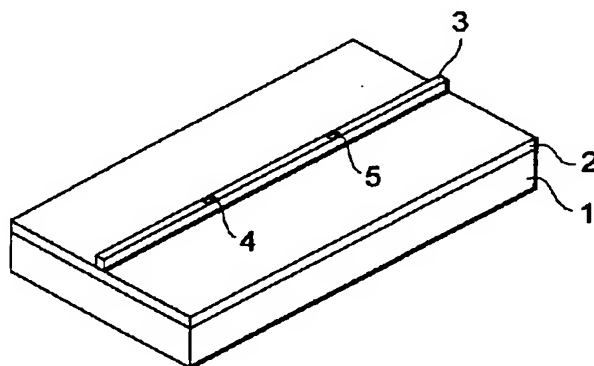
5F073 AA13 BA09 CA24 DA07 EA29

(54) 【発明の名称】 半導体光導波路の構造とこれを利用した光増幅器、光変調器、光発振器、光集積回路

(57) 【要約】

【課題】 集積回路性能で使用が可能な半導体光導波路およびこれを利用した光増幅器、光変調器、光発振器とこれらを用いた光集積回路を提供する。

【解決手段】 半導体基板と、半導体基板上に形成された絶縁膜と、絶縁膜上に形成された半導体細線と、半導体細線に形成された対の電極とを備え、半導体細線中に光を伝播させることを特徴とする。このように、本発明は、光集積回路において従来難問であった光配線の技術を初めて実用的に解決したものであって、LSIにおいて素子間の信号伝達に適用すれば、配線の占めるスペースが少ない、配線のCR時定数に対する考慮が不要である、増幅と方向性があるので部品を削減できる、超高周波信号を伝達できる等の利点により、LSIの設計製造を容易にし、巨大集積技術を可能にすることができる。



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】 半導体基板と、

前記半導体基板上に形成された絶縁膜と、  
前記絶縁膜上に形成された半導体細線と、  
前記半導体細線に形成された 1 対の電極とを備え、前記半導体細線中に光を伝播させることを特徴とする半導体光導波路の構造。

## 【請求項 2】 請求項 1 記載の半導体光導波路の構造と、

前記絶縁膜上の前記半導体細線の周辺に超格子周期性を有する構造とを備えることを特徴とする半導体光導波路の構造。

## 【請求項 3】 請求項 1 または請求項 2 記載の半導体光導波路の構造を利用することを特徴とする光増幅器。

## 【請求項 4】 請求項 1 または請求項 2 記載の半導体光導波路の構造を利用することを特徴とする光変調器。

## 【請求項 5】 請求項 1 または請求項 2 記載の半導体光導波路の構造を利用することを特徴とする光発振器。

## 【請求項 6】 請求項 1 または 2 に記載の半導体光導波路の構造、または請求項 3 に記載の光増幅器、または請求項 4 に記載の光変調器、または請求項 5 に記載の光発振器を含むことを特徴とする光集積回路。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、光を透過、増幅、変調ないし発振せしめる導波路の構造とこれを利用する光集積回路に関する。

## 【0002】

【従来の技術】半導体集積回路の高速化とともに、配線による信号の遅延が問題になってきている。これは、半導体の微細加工とともに、基板上の電気配線も微細化し、電気配線の CR 時定数が高速化の制限要因となってきたことによるものである。

【0003】この問題を打開するために、光を配線に使用することが試みられている。光は CR 時定数を持たないため、伝播時間が電気配線よりも速くなるからである。しかし、実用には多くの問題がある。例えば、基板上で光ファイバーを接続することは問題外である。光ファイバーは、集積回路の各要素よりも大きすぎ、配線のためには急激な曲がりが発生するため光損失が大きく、折れやすくなり、光ファイバーの接続および入出力が複雑となるため却って複雑な構造となること等の本質的難点を抱えているからである。

## 【0004】

【発明が解決しようとする課題】光を配線に使用することに関し、光ファイバーなどよりももっと簡単に、シリコン基板上に設置した導波路構造に光を通すことはある程度可能であり、実験が進められている。しかし、現在の集積回路は、光の波長よりもはるかに微細な寸法を必要としており、光の波長程度の導波路では大きすぎて集積

回路には適当でないという問題がある。したがって、上記導波路構造は、分波器などの特殊な装置のみに使用されており、集積回路性能の直接の改善にはならない。

【0005】そこで本発明は、集積回路性能で使用が可能な半導体光導波路およびそれを利用した光増幅器、光変調器、光発振器とこれらを用いた光集積回路を提供することを目的とする。

## 【0006】

【課題を解決するための手段】上記問題を解決するために、本発明の半導体光導波路の構造は、半導体基板と、半導体基板上に形成された絶縁膜と、絶縁膜上に形成された半導体細線と、半導体細線に形成された対の電極とを備え、半導体細線中に光を伝播させることを特徴とする。

【0007】また、本発明の別の半導体光導波路の構造は、半導体基板と、半導体基板上に形成された絶縁膜と、絶縁膜上に形成された半導体細線と、半導体細線に形成された 1 対の電極と、絶縁膜上の半導体細線の周辺に超格子周期性を有する構造とを備えることを特徴とする。

【0008】また、本発明の光増幅器、光変調器および光発振器は、上記 2 つの半導体光導波路の構造を利用することを特徴とする。

【0009】また、本発明に係る光集積回路は、上記 2 つの半導体光導波路の構造または上記 2 つの半導体光導波路の構造を利用した光増幅器、光変調器、光発振器を含むことを特徴とする。

【0010】本発明によれば、光信号を伝播する光導波路（光線路）を極めて細く小さくできるので、微細加工に適しており、この線路を通過させることによって信号の増幅、単一方向性を附与することができる。

【0011】更に、電極に印加する電圧によって光信号を変調ないしオン／オフができるなど、未だ想到されたことのない有利な効果が数多く得られる。

【0012】また、類似の技術分野として光情報処理があり、このような場合においても本発明の問題点と同様の問題を抱えており、光クロックタイミング遅延の解決に有用なものである。

【0013】本発明の思想には、本発明者が先に出願した特願平 11-268992 と共通する部分があり、当該先出願の発明は、金属導波管において適用され、テラヘルツ帯ないし遠赤外波長域に適当な応用範囲が見出されている。しかし、本願は導波路構造内でのプラズマ相互作用による電磁波の増幅現象を利用するものであり、光集積回路に適用できる波長範囲の光導波路とするために金属導波管を採用せず、半導体リッジ（細線）構造をもって光導波路とできることの発見を附加したものである。

## 【0014】

【発明の実施の形態】以下、添付図面を参照して本発明

にかかる実施形態について説明する。ただし、同一要素には同一符号を付し、重複する説明は省略する。

【0015】本発明の実施形態の説明にあたり、まず本発明の原理について説明する。

【0016】説明の例示としては、図1に示すような半導体リッジが参照される。この半導体リッジ3は、典型的にはシリコン基板1上にシリコン酸化膜のような絶縁性酸化膜2を形成し、その上に設けられる。半導体リッジ3は、誘電体導波路として作用するが、通常の誘電体導波路とは決定的な差異がある。

【0017】その第1は、その横幅が狭いことである。通常なら、波長を屈折率で割った物質内波長を基準として、それと同程度の横幅が選ばれるのであるが、本発明ではそれよりも細く選ぶ。

【0018】第2には、半導体にはキャリア（通常はn型半導体を用いるので典型的には電子）が存在し、このキャリアを細線方向に加速するべくその方向に駆動電界を印加することである。

【0019】このような場合、半導体内にはキャリア共鳴振動によるプラズマ周波数（ $\omega_p$ ）が特性値として存在するようになる。電磁波は、プラズマ振動と相互作用を行うので $\omega_p$ より高周波（短波長）側を通過させ、低周波（長波長）側を遮断することが知られている。

【0020】また、別の高周波導波路の性質として、カットオフ角周波数（ $\omega_c$ ）を有し、 $\omega_c$ より高周波（短波長）側を通過させ、低周波（長波長）側を遮断することが知られている。この $\omega_c$ は、電磁波モードや導波路の性質によって変わるものであるが詳細は後述する。

【0021】本発明は、走行キャリアの存在のもとにおいて $\omega_p$ と $\omega_c$ とを組み合わせることにより、新しく発生する効果の発見に基づくものである。上記半導体リッジ3中を電磁波が伝播するとき、そのモードにTMモードを選ぶ。このモードは伝播方向に高周波電界成分を有し、走行する電子の空間電荷波と結合する性質を有する。上記組み合わせによって従来とは全く異なり、（ $\omega_p^2 + \omega_c^2$ ）<sup>1/2</sup> で定義される合成角周波数よりも低周波（長波長）側が、遮断域から相互作用帯域に変化し、ここが通過帯領域となり、増幅が起こる。つまり、この帯域では通過電磁波の伝播速度は遅くなって、電子の走行速度と同程度になり、電子との相互作用を介してエネルギーの授受が行われ、これによって電磁波が増幅されるのである。

【0022】ここに適用される電磁波の波長は $\omega_p$ や $\omega_c$ などの角周波数に相当する波長と同程度のものが一般的には選ばれる。特に、本発明では光の領域の電磁波を主として対象とするので、 $\omega_p$ や $\omega_c$ は、その程度の値に設計されることになる。ここで、 $\omega_p$ とは次式で与えられる。

$$\omega_p = (q^2 n / \epsilon m)^{1/2}$$

qは電子電荷、nはキャリア密度、 $\epsilon$ は半導体の誘電

率、mはキャリアの有効質量である。また、 $\omega_c$ は、導波管の構造によって変化するので、その例として導波路断面が円形で、光ファイバーの構造をしているとき、次式で与えられる。

$$\omega_c = 4.8 \pi a / \lambda (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

aは半径、 $n_1$ は導波路自体の屈折率、 $n_2$ は導波路外部の屈折率である。また、他の例として、導波路断面が正方形の場合には、次式のように表される。

$$\omega_c = 2 a / \lambda (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

10 ここでaは、導波路断面の正方形の辺長である。

【0023】いずれにしても、（ $\omega_c^2 + \omega_p^2$ ）<sup>1/2</sup> よりも低周波（長波長）側が通過域となる。このことは、本発明の条件が成立しない通常の場合、例えば印加電圧が加わっていない場合や導波路が絶縁性誘電体の線路の場合などは、たとえどんな場合でもそれが示す固有の遮断周波数よりも低周波（短波長）側の光が遮断されることに対して逆の性質であり、大きな違いである。

【0024】例えば、 $\omega_p = \omega_c$ が選ばれたとすると、合成遮断周波数 $\omega_h$ は、 $1.4 \omega_p$ となり、これよりも低周波（長波長）側が適用帯域となる。これが、もし、本発明のように適用電磁波として光を対象とする場合には、通常の常識では光が通過できないほど細い導波路でも通過できることを示す。このことは、微細加工技術の進歩によって光配線の占めるスペースが少なくて済むことを意味しており、集積回路の小型化に有効であることが分かる。

【0025】しかも、この波長帯域においては、利得が得られる。この現象については、本発明者が先に出願した特願平11-268992において、詳述した理論の延長である。要点は、走行する電子が、プラズマ周波数で代表される空間電荷波を伴っており、これに光のTMモードが結合することによって、本来ならば遮断域であるため通過できない光波も電磁波に随伴することによって通過できるようになり、しかもその際に、電子の運動エネルギーを受けて波動のエネルギーに転換することである。

【0026】このとき達成される増幅度 $\alpha$ は、単位長あたり

$$\alpha = (\omega_h^2 - \omega^2)^{1/2} / c$$

40 の程度である。cは半導体中の光速であり $\omega$ は光波の角周波数である。この増幅度 $\alpha$ の値は、通常考えられる範囲で

$$10^{15} / 10^8 = 10^7 \quad [\text{m}^{-1}]$$

の程度なので、実用上は長さ100 $\mu\text{m}$ 程度あれば、増幅器として適用可能である。

【0027】一方、この導波路中で光波はドリフト電子により索引されるので、走行速度は $\beta c$ 程度となる。ここで、 $\beta$ は電子のドリフト速度と光速cとの比である。このため、導波路増幅器内では位相速度が大きく群速度が小さくなる。出力遅延時間は、導波路が長距離の場合

無視できないので、本発明の欠点となるが、チップ上での光配線のような短距離では許容されるものである。

【0028】以上述べたように、利得帯域幅は $\beta$  ( $\omega_n^2 - \omega^2$ )<sup>1/2</sup> 程度であり、いまの場合  $10^{12}$  [s<sup>-1</sup>] のオーダーであり、極めて大きい。このことを基本として光配線を含めた全体の回路設計がなされる。

【0029】次に、本発明に係る実施形態について述べる。

【0030】図1に、本実施形態に係る半導体導波路の概念的全体図を示す。半導体導波路は、シリコンや石英などからなる基板1と、基板1上に形成される絶縁膜であるシリコン酸化膜2と、シリコン酸化膜2上に設置した半導体リッジである光配線3と、光配線上に形成された電極4および5を備えている。基板1には、図示しない集積された通常の電子回路、例えばトランジスタ、コンデンサ等からなる論理回路、発振回路、メモリ回路、その他が載置される。

【0031】光配線3は半導体であるので、この場合にはシリコン細線が微細加工技術によって作製される。これを作る技術は公知であり、例えば、酸素イオン注入 (SIMOX) 法によって酸化膜上の結晶シリコンを形成でき、これを光配線3の半導体リッジに加工すれば良い。

【0032】この光配線3には、P (リン) がドーブされ、n型とされる。その濃度は、例えば  $10^{21}$  cm<sup>-3</sup> 程度とする。この場合の $\omega_p$ は、 $1.5 \sim 2 \mu\text{m}$ の光の波長に相当する。光配線3の寸法は、例えば幅  $1 \mu\text{m}$ 、高さ  $0.2 \mu\text{m}$  程度とする。この場合の $\omega_c$ は、 $1.5 \mu\text{m}$ の光の波長に相当する。したがって、この場合使用しうる光は、 $1.5 \mu\text{m}$  ないしそれよりも長波長の光となる。光配線3の材料であるシリコンのエネルギーバンドギャップから、 $1.1 \mu\text{m}$  よりも短波長はシリコンで吸収されるため当然使用できない。本実施形態で示す波長  $1.5 \mu\text{m}$  は、光通信に使用される波長であり、光配線3の設計は適当な設定である。

【0033】もし、半導体としてGaAsを用いるときは、GaAsのエネルギーバンドギャップから光の吸収のない光配線3に使用できる波長は  $0.85 \mu\text{m}$  よりも長波長側となる。GaAsを基板とする集積回路を構成する利点は、発光素子も容易に集積できる点にある。

【0034】また、前述した本発明者の先願である特願平11-268992で説明しているように、ローンチャーと名付けた入出力部分を電子走行部、すなわち増幅部分の前後に適宜設置する必要がある。ローンチャーについては該先願で説明した通り、導波路のテーパ構造部分であり、図1では図示を省略した。

【0035】電極4および5は、光配線3に附設した電極であって、この間に電圧を印加し、電子を走行させる。これによって電子の走行方向に光が増幅される。当然、伝播において方向性も発生し、信号逆行は阻止され

るので、受光器端における光反射が逆行伝播して回路条件を乱すこともない。増幅度 $\alpha$ は、電極4と電極5の間隔に比例するので、増幅するのに充分な間隔をとればよい。例えば  $100 \mu\text{m}$  間隔ならば  $\alpha = 10^3$  程度の増幅率である。間隔を増すと、前述した群遅延が大きくなるので、過大すぎるのは好ましくない。 $100 \mu\text{m}$  の電極間隔では  $1$  [ns] の遅延を生じる。このように、利得帯域幅はほぼ一定で、例えば  $10^{12}$  [s<sup>-1</sup>] 程度であるからその範囲で設計すればよい。

【0036】以上、説明したように、本実施形態に係る半導体導波路構造は、図1の光配線3によって増幅器が極めて小さく作製することができる。また、この増幅器は、信号の伝播方向性を与えるものであるから無駄な反射による信号の妨害を防ぐことができる。また、この増幅器の光配線3の出力導波路を分岐してその一部を入力端に帰還させることにより発振器を構成できることは自明である。また、この装置は、電極4、5への印加電圧によって上記の方向性増幅機能をオン/オフできるので、電圧による変調器としても応用することができる。

【0037】このように、本実施形態に係る半導体導波路の構造は、光集積回路に使用される基本機能をそれぞれ発揮しうるものであって、本構造は光集積回路のあらゆる部分の基礎を成すことができる。

【0038】ところで、誘電体ないし半導体導波路の性質として、線路の曲がりによる光信号の漏れが生じることによって光強度が減衰するため、本実施形態において、この線路の曲がりによる光強度の減衰について考えてみる。

【0039】一般に曲がりによる損失において、その曲率半径と導波路におけるコア対クラッドの屈折率差との間には相互関係があることが知られており、石英ガラス製の管ファイバーは、屈折率差が小さいので、曲げ損失が大きい。このような常識とは異なり、本実施形態に係る半導体 (シリコン) 導波路では、屈折率差が大きいので曲げ損失が少ない。

【0040】本発明者の経験によれば、屈折率差と曲率半径は、同じ損失量に対して逆比例の関係にあるため、半導体導波路では曲率半径  $1 \mu\text{m}$  程度であれば曲げ損失はそれほど小さくなく、 $10 \mu\text{m}$  程度ならば無視できる。そのため光配線3は、基板1上で自由に屈曲させることができる。そして、その途中の必要な部分に電極4および5を形成し、増幅器化、発振器化および変調器化すればよい。

【0041】次に、最近の新しい技術であるフォトリソグロフ構造を利用する光導波路構造について説明する。これは、基板1の表面に超格子構造を形成するもので、その周期性によって目的とする光の波長が禁止されるバンド構造が生ずる。このときに、その周期性を乱す1次元的な周期乱れがある時、その部分が導波路となることが知られている。このフォトリソグロフ導波路は、微

小光配線としての応用が考えられており、本実施形態とも関連がある。すなわち、この構造に本実施形態を組み合わせることで、更に有用な応用を図ることができる。

【0042】フォトリソバンド導波路における光配線部分は、既に述べた光配線と全く同様なものである。これにキャリアドリフトによる増幅作用を新規に追加することができる。得られる効果は、既に述べたものと同様であるが、フォトリソバンド導波路特有の長所も付随する。それは、バンド効果によって雑音が抑制されることである。そのこと自体は公知であるが、本実施形態のような増幅器と組み合わせることは、初めてのことであり、しかも増幅器の雑音指数を改善向上せしめる有効な特長を初めて獲得できるのである。

【0043】さらに、フォトリソバンド導波路の場合には、光配線3の曲がりにも強い。図2に示すように、光配線3の曲がりの曲率半径がいくら小さくてもよいので、光配線3には好適である。

【0044】図3に、フォトリソバンド導波路を、図1に示した半導体導波路に適用した場合の実施形態を示す。図3の半導体導波路は、シリコン基板1と、シリコン基板上に形成された絶縁膜であるシリコン酸化膜2と、シリコン酸化膜上に設置されたシリコンからなる光配線3とを備えている。これまでの構造は図1と同様であるが、図3の半導体導波路は、さらに、光配線3が設置されている部分以外のシリコン酸化膜2表面上に、シリコンで形成された周期格子6を設置している。

【0045】この周期格子6を作製する手段には、公知の手段がいろいろ利用できる。図3に示した半導体導波路では、シリコンのフォトリソエッチングによって周期格子状パターンを刻んでいる。この周期格子6の周期ピッチは、目的とする波長帯に対して計算により求める必要があるが、いま問題にしている光配線3の目的に対しては、サブミクロン程度の周期が必要である。例えば、図3において、シリコン薄膜を周期0.6  $\mu\text{m}$ 、ギャップを0.4  $\mu\text{m}$ とし、またその柱状の高さを1  $\mu\text{m}$ 程度とすれば、光通信に用いる波長1  $\mu\text{m}$ 以上の近赤外域の波長の光に対してフォトリソバンドを示す。ここで、周

期格子6の形状は、角柱としたが円柱でもよい。

【0046】図3に示すように、この周期格子6の中に半導体リッジである光配線3が延びている。この光配線3の取り扱いについては図1と全く同様であるから図示しないが、適当な位置に電極をつけてキャリアを走行させればよい。

【0047】この構造の効果については図1の場合と全く同様であって、増幅機能を有し、発振器および変調器としても使用できるため、光集積回路要素を発揮できる。ただ、このフォトリソバンド構造では図1を参照して説明した作用効果のほか、新しい効果も付随して出現する。それは、前述したようにフォトリソバンドで定まる禁止帯に相当する波長は存在を禁止されるため、空間中に雑音が存在しないことである。したがって、増幅器としては信号対雑音比が向上する。また、フォトリソバンド構造を用いることによって、発振器としての動作をするときに自然放射がないので、発振閾値の低いレーザ発振をさせることができる利点がある。

【0048】

【発明の効果】以上詳細に述べたように、本発明は光集積回路において従来難問であった光配線の技術を初めて実用的に解決したものであって他に比類がなく実用効果は極めて大きい。すなわち、本発明をLSIにおいて素子間の信号伝達に適用すれば、配線の占めるスペースが少なく、配線のCR時定数に対する考慮が不要である、増幅と方向性があるので部品を削減できる、超高周波信号を伝達できる等の利点により、LSIの設計製造を容易にし、巨大集積技術を可能にすることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本実施形態に係る半導体導波路の概略図である

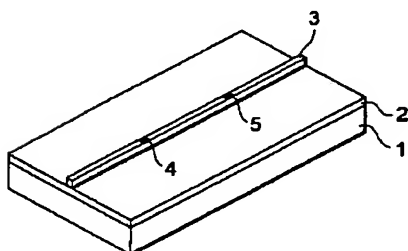
【図2】本実施形態に係る半導体導波路の光配線3を湾曲させた場合の概略図である。

【図3】本実施形態に係るフォトリソバンド構造を図1の半導体導波路に適用した場合の概略図である。

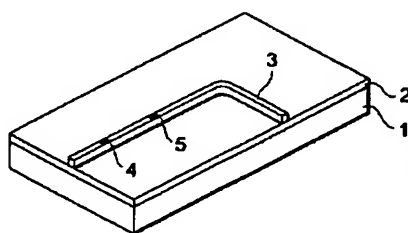
【符号の説明】

1…シリコンまたは石英基板、2…シリコン酸化膜、3…シリコンによる光配線、4、5…電極、6…シリコンによる周期格子

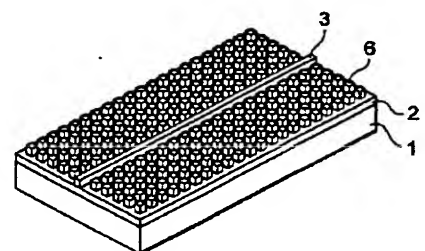
【図1】



【図2】



【図3】



**THIS PAGE BLANK (USPTO)**